

# Радиооптика

Сетевое научное издание  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

<http://radiooptics.ru>

Ссылка на статью:

// Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
Электрон. журн. 2015. № 05. С. 115–127.

DOI: **10.7463/rdopt.0515.0793200**

Представлена в редакцию: 31.07.2015

Исправлена: 16.08.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 551.501

## Натурные измерения статистических характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей в оптическом диапазоне

Филимонов П. А.<sup>1</sup>, Иванов С. Е.<sup>1</sup>,

Федотов Ю. В.<sup>1</sup>, Белов М. Л.<sup>1,\*</sup>,

Городничев В. А.<sup>1</sup>

\* [belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье описан лазерный измеритель статистических характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей, работающий в видимом спектральном диапазоне на длине волны излучения 0,532 мкм. Приведены параметры блоков лазерного измерителя статистических характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей. Представлены примеры типичного пространственно-временного распределения и гистограмм коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы. Результаты многодневных измерений показывают, что коэффициент вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы составляет величину  $\sim 3 - 6 \%$  для длины волны 0,532 мкм.

**Ключевые слова:** лазер, атмосфера, статистические характеристики аэрозольных неоднородностей, видимый спектральный диапазон

---

### Введение

Проектирование оптико-электронных систем, предназначенных для функционирования в земной атмосфере, требует оперативной информации о ее состоянии. Аэрозольные лидары, предназначенные для контроля состояния земной атмосферы, позволяют оперативно измерять параметры аэрозоля и облачных образований в атмосфере [1-7].

В настоящее время большинство аэрозольных лидаров измеряют средние характеристики атмосферы. Однако, научный и практический интерес представляют статистические характеристики атмосферных аэрозольных неоднородностей, описание которых практически не встречается в научно-технической литературе.

Данная статья посвящена натурным измерениям статистических характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей в видимом (на длине волны 0,532 мкм)

спектральном диапазоне. Такая задача представляет практический интерес для дистанционного контроля атмосферы (см., например, [8]).

Ниже приводится описание разработанного макета лазерного измерителя статистических характеристик атмосферных неоднородностей, использующего вторую (на длине волны 532 нм) гармонику лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима. Представлены примеры полученных данных натурных экспериментов, гистограммы и средние значения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы (коэффициент вариации объемного коэффициента обратного рассеяния является наиболее важным оптическим параметром атмосферы, определяющим возможности корреляционных лидаров [8]). Данных о статистических характеристиках коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы на сегодняшний день нет в научно-технической литературе.

## 1. Макет лазерного измерителя

Экспериментальные исследования статистических характеристик аэрозольных неоднородностей атмосферы на длинах волн 0,532 мкм проводились на созданном макете лазерного измерителя.

В макете лазерного измерителя в качестве источника излучения используется твердотельный импульсный ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$ лазер с полупроводниковой накачкой и модуляцией добротности. Данный лазер имеет модуль генерации второй гармоники, что позволяет получить длину волны лазерного излучения 0,532 мкм.

Лазер выполнен в виде блока питания, включающего в себя также полупроводниковый лазер накачки, и излучателя, состоящего из лазерной головки, генерирующего излучение на основной длине волны 1,064 мкм в ближнем инфракрасном диапазоне, и модуля генератора второй гармоники на длине волны 0,532 мкм.

Основные характеристики используемого твердотельного импульсного ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$ лазера с модулем второй гармоники приведены в таблице 1 [9].

Приемный объектив лазерного измерителя выполнен по схеме Кассегрена и имеет разъем для присоединения оптоволокну. Основные характеристики приемного объектива макета лазерного измерителя приведены в таблице 2.

**Таблица 1** Основные характеристики импульсного ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$ лазера с модулем второй гармоники

Параметр	Значение
Длина волны, мкм	0,532
Длительность импульса, нс	7
Энергия импульса, мДж	2
Частота повторения импульсов, Гц	500
Диаметр пучка, мм	0,8
Расходимость излучения, мрад не более	3

**Таблица 2** Основные характеристики приемного объектива

Параметр	Значение
Фокусное расстояние, мм	350
Относительное отверстие	1:2,6
Поле зрения $2\omega$ при использовании оптоволокну диаметром 1500 мкм	4,3 мрад

Объектив установлен на платформе, позволяющей менять наклон и поворот приемного объектива относительно лазерного излучателя.

Излучение от приемного объектива транспортируется по оптическому волокну в оптический блок. Оптический блок служит для спектральной селекции полезного лазерного сигнала и преобразования оптического диапазона в электрический сигнал.

В качестве фотоприемника использовался фотоэлектронный умножитель Hamamatsu H10721-20 [10,11]. Фотоэлектронный умножитель имеет в своем составе высоковольтный источник питания, что существенно упрощает работу с фотоприемником и повышает его надежность. Фотоэлектронный умножитель имеет возможность электронной регулировки коэффициента усиления в широких пределах.

Для получения сигнала, уровень которого достаточен для работы амплитудно-цифрового преобразователя, к выходу фотоэлектронного умножителя подключался широкополосный усилитель Hamamatsu C5594.

Архитектура PXI (PCI Extensions for Instrumentation – расширение шины PCI для контрольно-измерительной аппаратуры) [12] была использована для реализации системы регистрации сигналов и управления макетом лазерного измерителя.

Для преобразования аналоговых сигналов в цифровую форму в макете лазерного измерителя использовался модуль высокоскоростного амплитудно-цифрового преобразователя – дигитайзера - АЦП NI PXI-5124.

Тематическая обработка сигналов, отображение, сохранение результатов и общее управление, осуществлялось на персональном компьютере, работающем под управлением операционной системы Windows.

В макете лазерного измерителя использовалось программное обеспечение, разработанное в среде графического программирования NI LabVIEW. Она позволяет быстро и высокоэффективно создавать гибкие, легко изменяемые приложения [13].

Для хранения результатов натурных измерений использовался формат Technical Data Management Streaming (TDMS) [14]. Этот формат позволяет сохранять регистрируемые данные с высокой скоростью и хранить в одном файле результаты измерений и данные описывающие условия проведения натурального эксперимента.

Проводимые в блоке обработки лазерного измерителя операции позволяют выделить из зарегистрированного приемником обратно рассеянного атмосферой сигнала относительные флуктуации объемного коэффициента обратного рассеяния:

$$\frac{\tilde{\beta}_i(r)}{\bar{\beta}(r)} \approx \frac{P_i(r) - \bar{P}(r)}{\bar{P}(r)}, \quad (1)$$

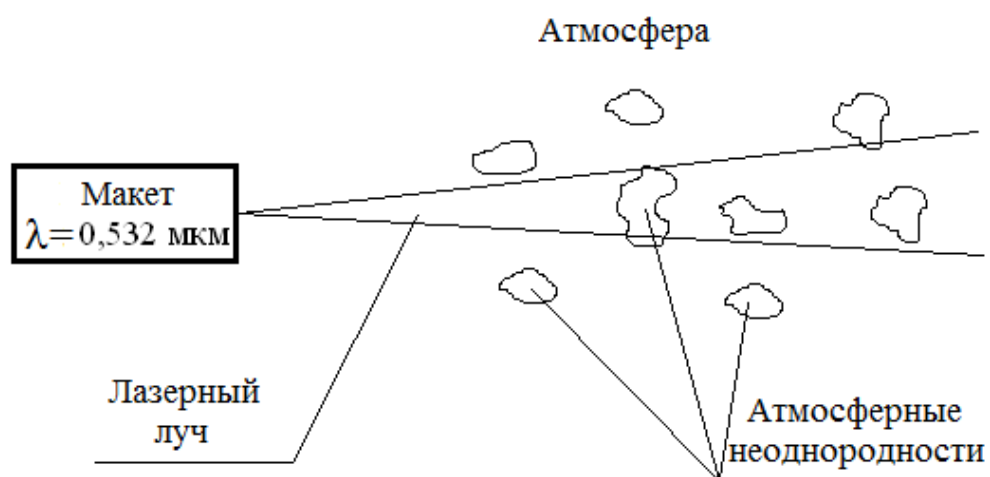
где  $P_i(r)$  - реализация лазерного сигнала обратного рассеяния для  $i$ -ого зондирующего импульса;  $\bar{P}(r)$  – среднее по серии зондирующих импульсов значение лазерного сигнала обратного рассеяния;  $\bar{\beta}(r)$ ,  $\tilde{\beta}_i(r)$  - пространственное распределение среднего значения и флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеивания атмосферы для  $i$ -ого зондирующего импульса.

Полученное двумерное поле относительных флуктуаций объемного коэффициента обратного рассеяния фильтруется. На последнем этапе обработки вычисляются параметры аэрозольных неоднородностей атмосферы. Полученные результаты отображаются и при необходимости сохраняются.

## 2. Результаты натурных измерений и их обсуждение

Схема проведения натурных экспериментов по измерению статистических характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей приведена на рисунке . .

Макет лазерного измерителя посылает в атмосферу короткий импульс и регистрирует обратно рассеянное (в сторону приемника) лазерное излучение. Значение коэффициента вариации неоднородностей объемного коэффициента обратного определяются по формуле (1) из данных измерений реализаций лазерного сигнала обратного рассеяния.



**Рис. 1.** Схема проведения эксперимента.

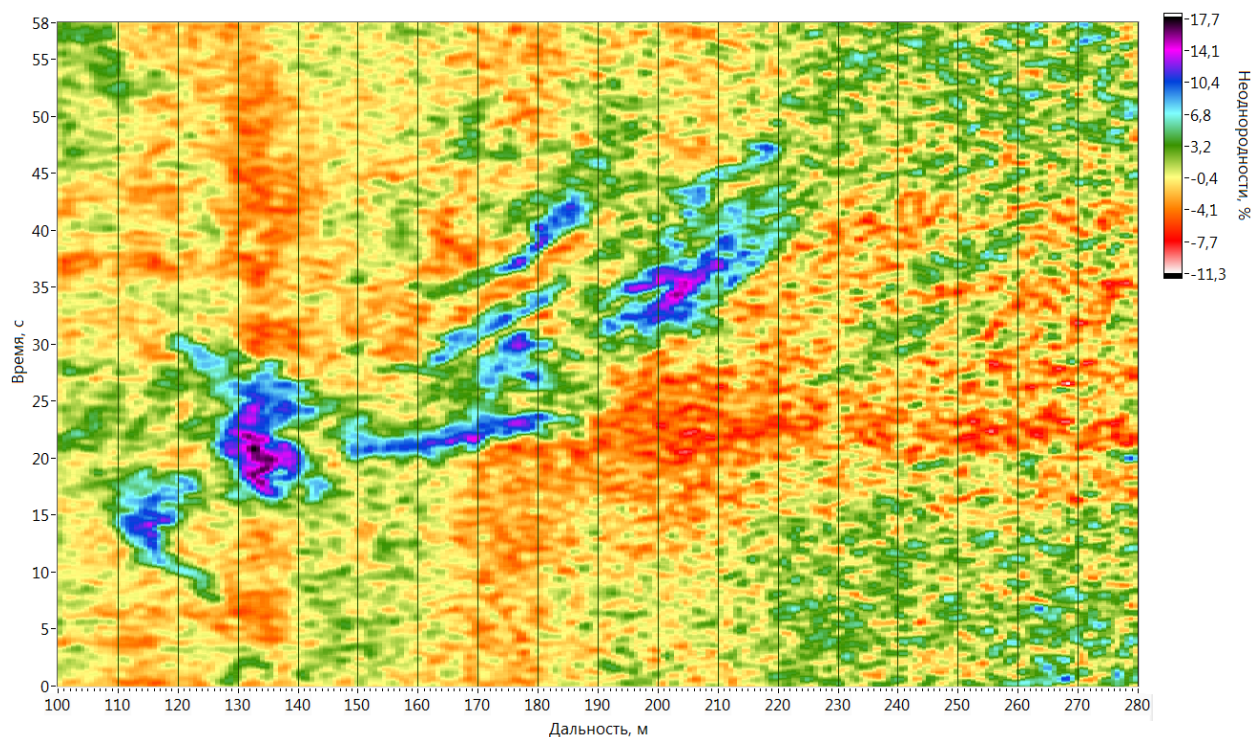
С помощью созданного макета проводились экспериментальные исследования статистических характеристик аэрозольных неоднородностей атмосферы на длинах волн 0,532 мкм в весенне-летний период года.

На рисунке 2 приведены типичные примеры (а, б, в) измерения пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы (коэффициент вариации определяется как отношение СКО объемного коэффициента обратного рассеяния к среднему значению объемного

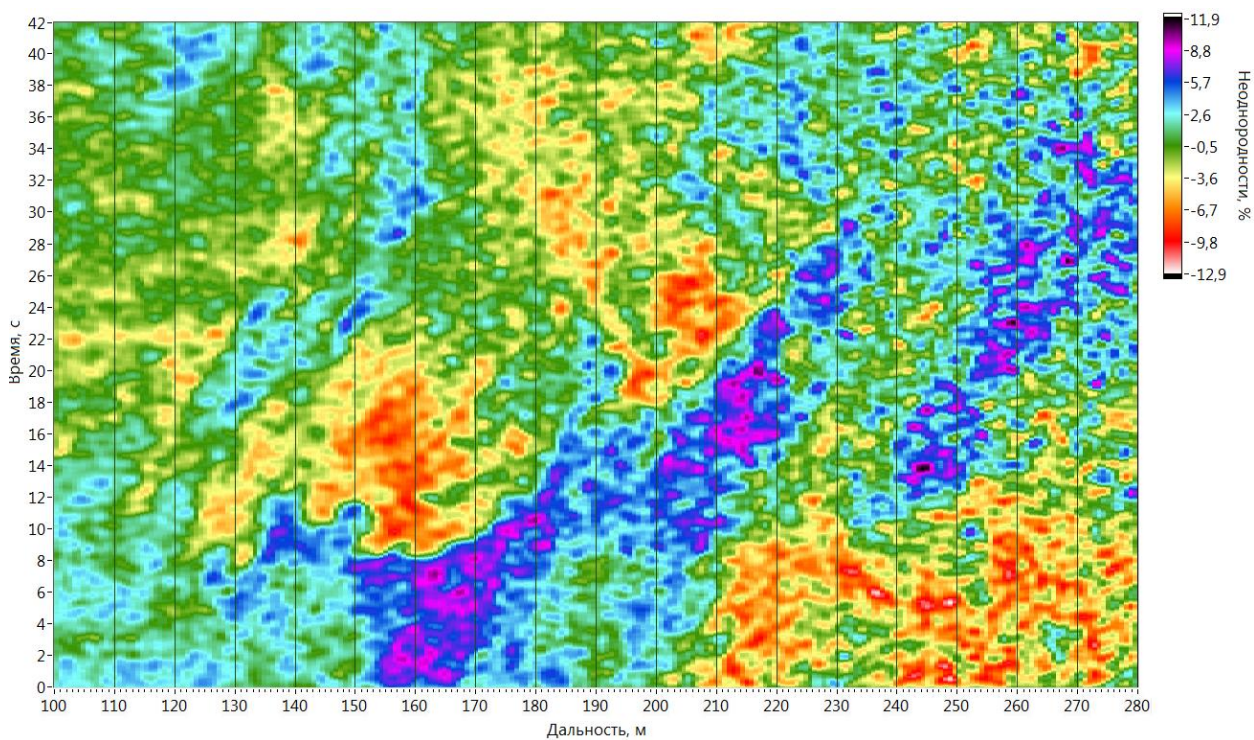


коэффициента обратного рассеяния) на длине волны 0,532 мкм в разное время для одного летнего дня.

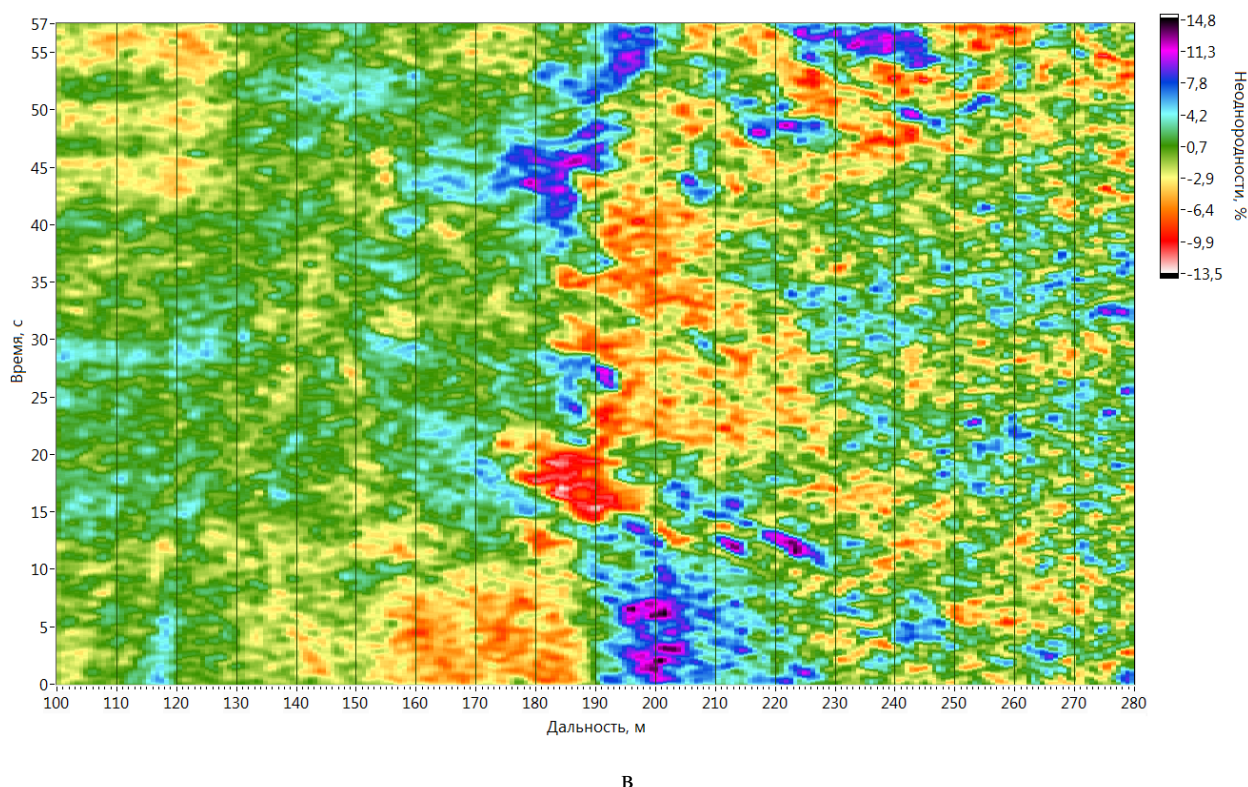
На рисунках по оси абсцисс отложено расстояние до лазерного измерителя, а по оси ординат – время регистрации лазерного сигнала.



а



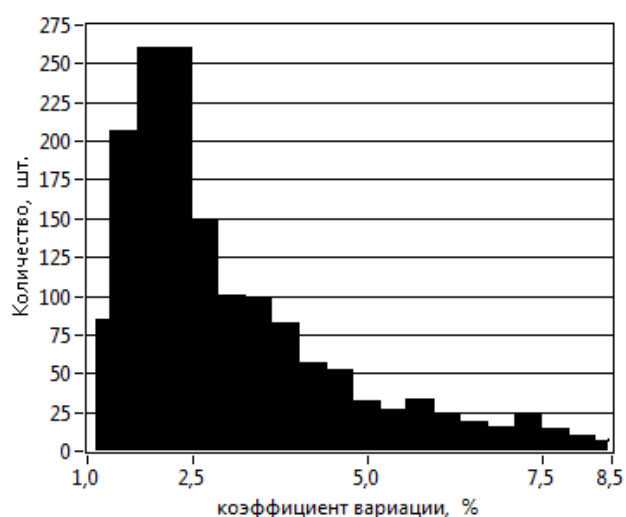
б



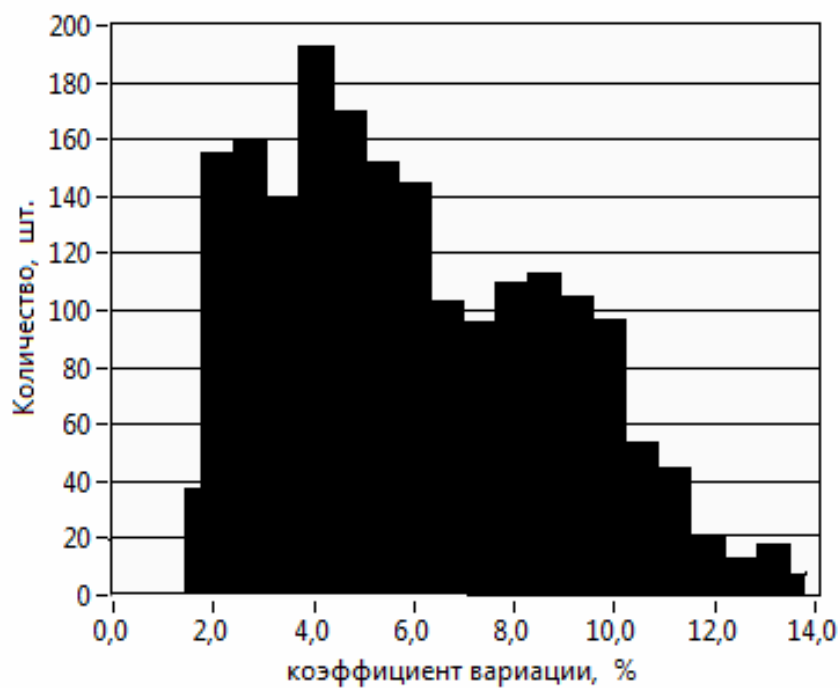
**Рис. 2.** Примеры пространственно-временного распределения коэффициента вариации

На рисунке 2 результаты измерений сглажены для устранения влияния высокочастотных флуктуаций. Окно сглаживания по времени равнялось 0,5 с , а по дальности - 1,5 м. При данных измерениях погода была облачная, метеорологическая дальность видимости более 15 км.

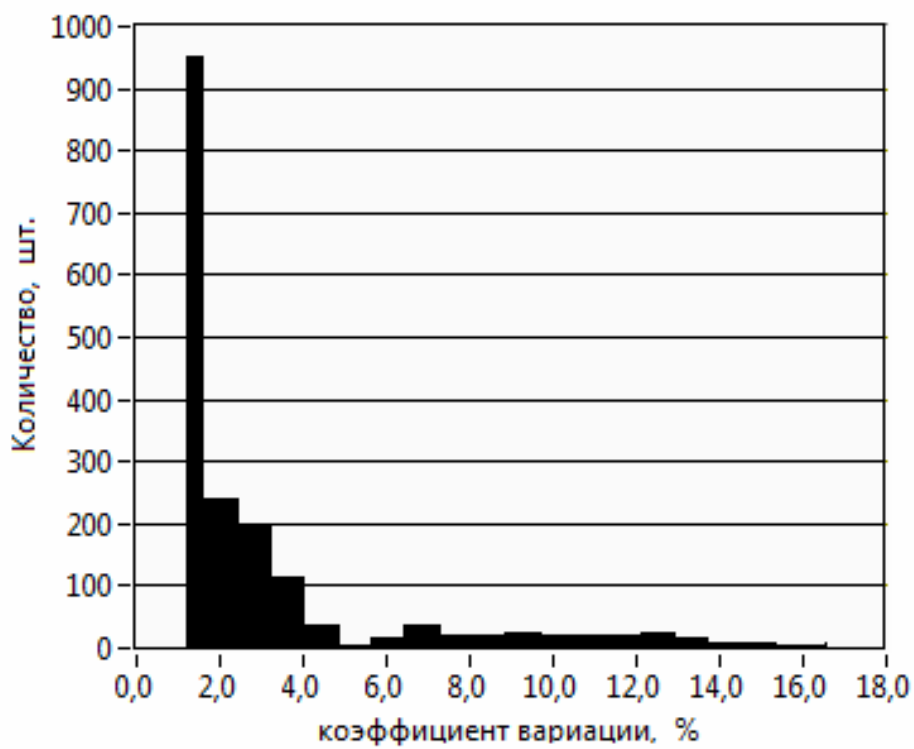
Примеры результатов обработки массивов пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента для разных дней (а, б, в, г) измерения представлены на рисунке 3.



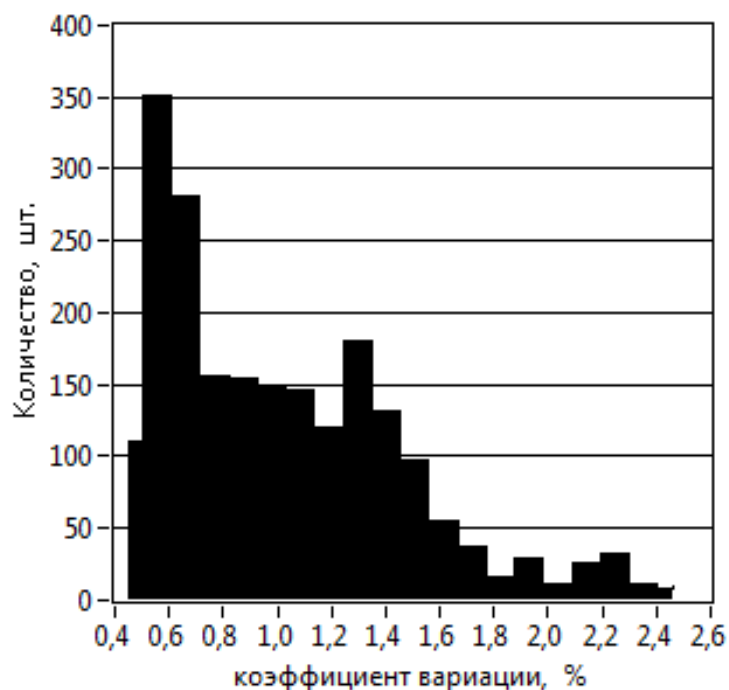
а



б



в



г

**Рис. 3.** Примеры гистограмм коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы

На рисунках показаны гистограммы коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы.

Каждая гистограмма на рисунках получена по многим данным измерений в течение одного дня. Гистограммы получены для сигнала с расстояния от 100 м до 200 м до лазерного измерителя (для этих расстояний реализуется большое отношение сигнал/шум).

Как видно из рисунка 3 (а – г) коэффициент вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы может принимать значения в диапазоне 0,5 – 14 %. Гистограммы коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы претерпевают существенные изменения и могут сильно отличаться даже в похожих погодных условиях. Результаты многодневных измерений показывают, что среднее значение коэффициента вариации коэффициента обратного рассеяния атмосферы по данным измерений лежит в диапазоне – 3 - 6 %.

### Заключение

Описан разработанный лазерный измеритель статистических характеристик атмосферных аэрозольных неоднородностей, работающий в видимом диапазоне на длине волны излучения 0,532 мкм. Приведены характеристики блоков лазерного измерителя. Представлены примеры типичного пространственно-временного распределения коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы на длине волны 0,532 мкм и результаты обработки экспериментальных данных –



гистограммы коэффициента вариации. Коэффициент вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы может принимать значения в диапазоне 0,5 – 14 %. Гистограммы коэффициента вариации объемного коэффициента обратного рассеяния атмосферы претерпевают существенные изменения и могут сильно отличаться даже в похожих погодных условиях. Результаты многодневных измерений в весенне-летний показывают, что среднее значение коэффициента вариации коэффициента обратного рассеяния атмосферы лежит в диапазоне – 3 - 6 %.

### Список литературы

1. Лидары. Режим доступа: <http://www.iao.ru/ru/resources/equip/lidars> (дата обращения 20.07.2015).
2. Лазерное зондирование атмосферы. Режим доступа: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> (дата обращения 20.06.2015).
3. Разенков И.А. Аэрозольный лидар для непрерывных атмосферных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 1. С. 52–63.
4. Волков Н.Н.. Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы. Отработка метода. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, 2012, № 1 (77), С. 7-9.
5. Мобильный многоволновой лидарный комплекс. Режим доступа: <http://researchpark.spbu.ru/equipment-emc/1345-emc-mobilniy-mnogovolnovoy-lidarniy-komplex> (дата обращения 20.07.2015).
6. Лазерные лидарные комплексы. Режим доступа: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (дата обращения 20.07.2015).
7. Иванов С.Е., Филимонов П.А., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Городничев В.А. Сравнительный анализ дальности зондирования для различных вариантов аэрозольного лидара // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/754084.html> (дата обращения 05.07.2015).
8. Козинцев В.И., Иванов С.Е., Белов М.Л., Городничев В.А. Лазерный метод приближенного измерения мгновенной скорости и направления ветра // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 5. С. 381–384.
9. NL200 series laser datasheet. Режим доступа: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/nl200-series-nanosecond-q-switched-diode-pumped-laser.pdf> (дата обращения 15.07.2015).
10. Hamamatsu. Photosensor module H10720-20. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html> (дата обращения 15.07.2015).

11. Hamamatsu. Photosensor module H7826-01. Режим доступа: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H7826-01/index.html> (дата обращения 15.07.2015).
12. Стандарт PXI — технология и оборудование для построения контрольно-измерительных систем. Режим доступа: <http://www.prosoft.ru/cms/f/443422.pdf> (дата обращения 15.07.2015).
13. LabVIEW. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/library/comp/labview/> (дата обращения 20.07.2015).
14. The NI TDMS File Format [Online].- Режим доступа: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/> (accessed: 20.06.2015).

## Field Measuring Statistical Properties of Atmospheric Aerosol Inhomogeneity in Optical Spectral Band

P.A. Filimonov<sup>1</sup>, S.E. Ivanov<sup>1</sup>, Yu.V. Fedotov<sup>1</sup>,  
M.L. Belov<sup>1,\*</sup>, V.A. Gorodnichev<sup>1</sup>

[\\*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** laser, atmosphere, aerosol inhomogeneity statistical properties, visible spectral band

---

Now, nearly all aerosol lidars measure the average properties of the atmosphere. However, almost a lack of statistical properties of atmospheric aerosol inhomogeneity described in publications of science and technology is of scientific and practical interest.

This work concerns the field measurements of statistical properties of atmospheric aerosol inhomogeneity in visible (at the wavelength of 0.532μm) spectral band. Such a task is of practical interest for remote control of the atmosphere.

A created model of the laser measurement device enabled us to take field measurements of statistical properties of aerosol inhomogeneity of the atmosphere at the wavelength of 0.532μm. As a source of radiation, the model of the laser measurement device uses the yttrium - aluminum pomegranate laser activated by neodymium ions. A laser module for generation of the second harmonica allows receiving laser radiation wavelength of 0.532μm. To implement the reception lens of the laser measurement device is used Kassegren's scheme.

The model of the laser measurement device uses the software developed in the environment of graphic programming NI LabVIEW.

Operations performed in the processing block allow us to distinguish relative fluctuations of a volume factor of the back scattering from the recorded laser signal, which is back scattered by the atmosphere.

The paper gives typical examples of laser measurements of an existentially distributed variation coefficient of the back scattering volume factor of the atmosphere. It presents results of data processing of field measurements: histograms and average values of a variation coefficient of the back scattering volume factor of the atmosphere.

It is shown that the variation coefficient values of the back scattering volume factor of the atmosphere can be within the range of 0.5 - 14%. Histograms of a variation coefficient of the back scattering volume factor of the atmosphere undergo essential changes and can strongly differ even in similar weather conditions. Results of multi-day measurements show that an average

value of the variation coefficient of the back scattering volume factor of the atmosphere is in the range 3 - 6%.

## References

1. Lidary [Lidars]. [www.iao.ru](http://www.iao.ru): Institute of atmospheric optics website. Available at: <http://www.iao.ru/ru/resources/equip/lidars> (accessed 07.2015). (in Russian).
2. Lazernoe zondirovanie atmosfery [Laser sensing of the atmosphere]. [www.astro.bsu.edu.ru](http://www.astro.bsu.edu.ru): observatory website. Available at: <http://astro.bsu.edu.ru/lidar.htm> (accessed 20.06.2015). (in Russian).
3. Razenkov I.A. Aerosol lidar for continuous atmospheric measurements. *Optika atmosfery i okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 1, pp. 52–63. (in Russian).
4. Volkov N.N. Choice of multiwave aerosol lidar parameters for remote atmosphere sounding. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki = Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no. 1 (77), pp. 7-9. (in Russian).
5. Mobil'nyy mnogovolnovoy lidarnyy kompleks [Multiwave mobile lidar complex]. <http://researchpark.spbu.ru/>: project website. Available at: <http://researchpark.spbu.ru/equipment-emc/1345-emc-mobilniy-mnogovolnovoy-lidarniy-kompleks> (accessed 20.07.2015). (in Russian).
6. Lazernye lidarnye komplekсы [Laser lidar complexes]. <http://www.adventspb.ru/>: company website. Available at: <http://www.adventspb.ru/science/6/> (accessed 20.07.2015). (in Russian).
7. Ivanov S.E., Filimonov P.A., Fedotov Yu.V., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Comparative analysis of sounding range for different versions of aerosol lidar. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 1. (in Russian). Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/754084.html> (accessed 05.07.2015).
8. Kozintsev V.I., Ivanov S.E., Belov M.L., Gorodnichev V.A. Laser method of approximate measurement of instantaneous wind velocity and direction. *Optika atmosfery i okeana - Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 5, pp.381–384. (in Russian).
9. NL200 series laser datasheet. <http://www.ekspla.com/>: company website Available at: <http://www.ekspla.com/wp-content/uploads/2011/05/nl200-series-nanosecond-q-switched-diode-pumped-laser.pdf> (accessed 15.07.2015).
10. Hamamatsu. Photosensor module H10720-20. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com): company website. Available at: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H10720-20/index.html> (accessed 15.07.2015).
11. Hamamatsu. Photosensor module H7826-01. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com): company website. Available at: <http://www.hamamatsu.com/jp/en/product/category/3100/3003/3044/H7826-01/index.html> (accessed 15.07.2015).

12. *Standart PXI — tekhnologiya i oborudovanie dlya postroeniya kontrol'no-izmeritel'nykh system* [PXI standard – technology and equipment for instrumentation system building]. [www.prosoft.ru](http://www.prosoft.ru): project website. Available at: <http://www.prosoft.ru/cms/f/443422.pdf> (accessed 15.07.2015).
13. *LabVIEW*. [www.twirpx.com](http://www.twirpx.com): project website. Available at: <http://www.twirpx.com/library/comp/labview/> (accessed 20.07.2015).
14. *The NI TDMS File Format*. [www.ni.com](http://www.ni.com): project website. Available at: <http://www.ni.com/white-paper/3727/en/> (accessed 20.06.2015).